

# ЭФФЕКТ ЯРКОВСКОГО И ДИНАМИЧЕСКАЯ ЭВОЛЮЦИЯ АСТЕРОИДОВ

Э. Д. Кузнецов

*Уральский федеральный университет*

В лекции дается описание эффекта Ярковского. Рассматриваются суточный и сезонный эффекты и их зависимость от наклона оси вращения астероида. Описывается влияние эффекта Ярковского—О'Кифа—Радзиевского—Пэддэка (YORP-эффект) на угловую скорость вращения астероида. Приводятся сведения о методах обнаружения влияния эффекта Ярковского и YORP-эффекта по результатам наблюдений. Обсуждаются проявления эффекта Ярковского в наблюдаемом распределении орбит астероидов: сближение орбит астероидов в семействах, пары астероидов на близких орбитах, эволюционное расширение семейств астероидов, распределение астероидов по угловой скорости вращения и направлению оси вращения. Формулируются задачи для будущих исследований.

## THE YARKOVSKY EFFECT AND DYNAMICAL EVOLUTION OF ASTEROIDS

E. D. Kuznetsov

*Ural Federal University*

The Yarkovsky effect is described in the lecture. Diurnal and season effects as well as their dependence on obliquity of axis of rotation of an asteroid are considered. Effect of the Yarkovsky—O'Keefe—Radzievskii—Paddack effect (YORP-effect) on rotation rate of an asteroid is described. Data about observational methods of the Yarkovsky and YORP effects detection are given. Evidences of the Yarkovsky effect in observed distribution of asteroids are discussed. These are orbital convergence in asteroid families, pairs of asteroids on close orbits, it is spreading of asteroids families, it is distribution of rotation rate and obliquity for asteroids. The goals for future works are previewed.

## Введение

Иван Осипович Ярковский — русский ученый польского происхождения, инженер. В 1901 г. написал в брошюре «Плотность све-

тового эфира и оказываемое им сопротивление движению» [1, 2], что нагреваемая солнечным теплом вращающаяся в прямом направлении планета должна испытывать трансверсальное ускорение. И. О. Янковский оценил величину рассмотренного эффекта, но его работа не нашла отклика и была забыта на несколько десятилетий.

В 1951 г. Э. Эпик [3] ввел работу И. О. Янковского в научный оборот. Практически одновременно с этим в СССР В. В. Радзиевский [4] с коллегами рассматривали влияние светового давления на движение вращающегося тела, имеющего неоднородную поверхность, — участки поверхности тела различались значениями альбедо. Однако наблюдения не подтверждали наличия заметной вариации альбедо поверхности астероидов. Дальнейший толчок задаче придали С. Пэддэк [5] и Дж. О'Киф, которые рассмотрели тело нерегулярной формы и показали, что под действием солнечного излучения возможно изменение скорости осевого вращения тела. Был сделан вывод, что этот эффект является причиной наблюдаемого избытка быстро-вращающихся объектов среди небольших асимметричных астероидов, приводящего к их разрыву центробежными силами. Окончательно формулировка задачи и терминология были установлены в работе Д. Рабинкэма [6], который и предложил название «эффект Янковского—О'Кифа—Радзиевского—Пэддэка» (YORP-эффект).

В 1965 г. группа В. В. Радзиевского рассмотрела задачу о движении синхронного спутника планеты под влиянием светового давления [7]. Идеи, изложенные в этой работе, позднее были использованы при рассмотрении задачи об эволюции двойных астероидов под влиянием светового давления [8]. Рассмотренный эффект получил название «binary YORP-эффект» или BYORP-эффект.

В конце 1990-х гг. начался современный этап исследований динамической эволюции малых тел Солнечной системы с учетом эффекта Янковского и YORP-эффекта. Подробное описание этих эффектов дано в работах [9–11].

В настоящей работе будут приведены основные результаты, полученные в ходе исследования эффектов Янковского и YORP, а также будут сформулированы задачи для будущих исследований.

## Теория эффектов Янковского и YORP

Рассмотрим простые аналитические модели эффектов Янковского и YORP, описывающие основные качественные свойства этих эффектов.

## Эффект Ярковского

Поглощенное и непосредственно отраженное солнечное излучение не приводит к долгопериодическим динамическим эффектам [12]. Эффект Ярковского определяется тепловым излучением тела, имеющего ненулевую тепловую инерцию. Для корректного учета влияния эффекта Ярковского требуется использовать теплофизическую модель тела. К счастью, оценка влияния эффекта Ярковского слабо зависит от формы объекта, поэтому даже простая сферическая модель позволяет получить удовлетворительные результаты.

Влияние эффекта Ярковского проявляется во всех элементах орбиты. Особенностью эффекта Ярковского является то, что он приводит к вековым возмущениям большой полуоси орбиты. Полагая, что сферическое тело движется по круговой орбите и вращается вокруг своей оси, получим среднюю скорость векового изменения большой полуоси орбиты  $a$ , складывающуюся под влиянием двух эффектов [11]:

суточного

$$\left(\frac{da}{dt}\right)_{\text{diurnal}} = -\frac{8}{9} \frac{\alpha \Phi}{n} W(R_\omega, \Theta_\omega) \cos \gamma \quad (1)$$

и сезонного

$$\left(\frac{da}{dt}\right)_{\text{seasonal}} = \frac{4}{9} \frac{\alpha \Phi}{n} W(R_n, \Theta_n) \sin^2 \gamma. \quad (2)$$

Здесь

$$\Phi = \frac{\pi R^2 F}{mc},$$

где  $R$  — радиус тела;  $F$  — поток излучения Солнца на гелиоцентрическом расстоянии  $a$ ;  $m$  — масса тела;  $c$  — скорость света;  $n$  — среднее движение тела;  $\alpha = 1 - A$ , причем  $A$  — сферическое альбедо [13]. Параметр  $\Phi$  характеризует физические эффекты, связанные с поглощением или рассеянием света поверхностью тела. Обычно полагают  $\Phi \propto 1/R$ .

Более важно то, что и суточный, и сезонный эффекты Ярковского зависят от наклона оси вращения астероида  $\gamma$ . Величина суточного эффекта пропорциональна  $\cos \gamma$  и может вызывать как увеличение, так и уменьшение большой полуоси орбиты, достигая максимума при значениях наклона  $\gamma = 0$  и  $180^\circ$  (см. уравнение (1)). Вклад сезонного эффекта пропорционален  $\sin^2 \gamma$  (см. уравнение (2)), поэтому

он всегда ведет к увеличению большой полуоси, достигая максимума при  $\gamma = 90^\circ$ . Амплитуда возмущений пропорциональна функции

$$W(R_\nu, \Theta_\nu) = \frac{k_1(R_\nu)\Theta_\nu}{1 + 2k_2(R_\nu)\Theta_\nu + k_3(R_\nu)\Theta_\nu^2}, \quad (3)$$

зависящей от теплофизических параметров тела и частоты  $\nu$ , которая равна частоте вращения тела  $\omega$  для суточного эффекта и среднему движению  $n$  для сезонного. Термические параметры зависят от свойств поверхности: коэффициента теплопроводности  $K$ , теплоемкости  $C$ , плотности  $\rho$ . Эти параметры вместе с частотой  $\nu$  не входят явно в уравнение (3). При решении задачи диффузии тепла и при определении возмущений орбиты они комбинируются в два важных параметра. Первый — длина

$$\ell_\nu = \sqrt{\frac{K}{\rho C \nu}},$$

соответствующая характерной глубине слоя, в котором с частотой  $\nu$  происходит переизлучение поглощенного тепла. Безразмерный радиус тела  $R_\nu$  в (3) есть

$$R_\nu = \frac{R}{\ell_\nu}.$$

Второй параметр — тепловая инерция поверхности

$$\Gamma = \sqrt{K \rho C} -$$

определяет безразмерный тепловой параметр  $\Theta_\nu$  в (3):

$$\Theta_\nu = \frac{\Gamma \sqrt{\nu}}{\varepsilon \sigma T_\star^3},$$

где  $\varepsilon$  — коэффициент теплового излучения поверхности;  $\sigma$  — постоянная Стефана—Больцмана;  $T_\star$  — температура подсолнечной точки ( $\varepsilon \sigma T_\star^4 = \alpha F$ ).

В пределе большого тела, когда  $R \gg \ell_\nu$ , все три коэффициента  $k$  в (3) примерно равны  $1/2$  [14]. Следовательно, для больших тел функция  $W$  не зависит от размера  $R$ :

$$W \simeq W(\Theta_\nu) = -\frac{0.5\Theta_\nu}{1 + \Theta_\nu + 0.5\Theta_\nu^2}.$$

Отсюда получаем, что эффект Ярковского максимален, когда  $\Theta_\nu \simeq 1$  (при малых или больших значениях  $\Theta_\nu$  эффект становится пренебрежимо малым). В этом случае вековые возмущения большой полуоси, обусловленные эффектом Ярковского,

$$\frac{da}{dt} \propto \frac{1}{R}. \quad (4)$$

Для небольших астероидов, движущихся в окрестности Земли и в главном поясе,  $\Theta_\omega \sim 1$ , а  $\Theta_n \ll 1$  [11]. Из этого следует, что суточный эффект Ярковского доминирует над сезонным.

### YORP-эффект

YORP-эффект является эквивалентом эффекта Ярковского, заключающимся в возрастании момента вращения астероида под влиянием солнечного излучения. Поглощенное астероидом излучение не приводит к вековым эффектам орбитального движения [15]. Однако рассеянное в оптическом диапазоне излучение и переизлученное тепловое на длительных интервалах времени вносят вклад в динамику осевого вращения. Причем рассеяние и переизлучение по-разному влияют на осевое вращение. Вдобавок тепловая компонента имеет временную задержку, связанную с конечным значением тепловой инерции поверхности.

YORP-эффект пренебрежимо мал для тел простой формы (например, для эллипсоида вращения [15]) и проявляется для тел сложной и неправильной формы [5]. В качестве нулевого приближения для описания YORP-эффекта можно выбрать следующую модель:

- пренебрегаем тепловой инерцией поверхности;
- предполагаем, что отражение и переизлучение происходят изотропно и удовлетворяют закону Ламберта;
- рассматриваем тела, поверхность которых можно аппроксимировать многогранниками или сферическими функциями;
- полагаем, что тело вращается относительно главной оси инерции;
- пренебрегаем взаимным затенением элементов поверхности.

После осреднения по орбитальному и суточному периодам долгопериодические изменения угловой скорости осевого вращения  $\omega$  и наклона оси вращения  $\gamma$  принимают вид [11]

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{\Lambda}{C} \sum_{n \geq 1} A_n P_{2n}(\cos \gamma), \quad (5)$$

$$\frac{d\gamma}{dt} = \frac{\Lambda}{C\omega} \sum_{n \geq 1} B_n P_{2n}^1(\cos \gamma). \quad (6)$$

Здесь

$$\Lambda = \frac{2FR^3}{3c},$$

$C$  — момент инерции, соответствующий оси вращения (наиболее короткая ось тензора инерции),  $P_{2n}(\cos \gamma)$  — полиномы Лежандра четных степеней,  $P_{2n}^1(\cos \gamma)$  — присоединенные функции Лежандра. Отметим свойства полиномов Лежандра четных степеней и соответствующих им присоединенных функций Лежандра первого порядка в уравнениях (5) и (6) относительно замены  $\gamma \leftrightarrow \pi - \gamma$  (прямое и обратное отражение): скорость вращения симметрична относительно этой замены переменных, наклон оси вращения — антисимметричен. Поскольку полином Лежандра второй степени обращается в нуль при  $\gamma \approx 55^\circ$  и  $\gamma \approx 125^\circ$ , как следует из уравнения (5), влияние YORP-эффекта на угловую скорость вращения  $\omega$  при указанных наклонах  $\gamma$  становится пренебрежимо малым [11].

Поскольку  $C \propto R^5$ , из уравнений (5) и (6) следует, что

$$\frac{d\omega}{dt} \propto \frac{1}{R^2}, \quad \frac{d\gamma}{dt} \propto \frac{1}{R^2}. \quad (7)$$

Это указывает на важное различие между эффектами Ярковского и YORP (сравним уравнения (4) и (7)) и означает, что малые астероиды под влиянием YORP-эффекта могут приобретать высокую угловую скорость вращения. Однако для слишком малых тел эффект Ярковского перестает действовать. Когда характерный радиус  $R$  становится сравнимым с характерной глубиной слоя  $\ell_\omega$ , астероид прогревается полностью и разность температур на его поверхности становится очень малой.

### BYORP-эффект

Впервые YORP-эффект применительно к двойному астероиду (BYORP-эффект) был рассмотрен в работе [8]. Было показано, что синхронно вращающийся асимметричный спутник астероида подвержен действию результирующей силы, направленной по касательной к его орбите. Поскольку спутник находится в спин-орбитальном резонансе 1:1 и вращается синхронно, то он периодически ускоряется и тормозится, двигаясь по раскручивающейся или скручивающейся спирали соответственно. Необходимым условием проявления

BYORP-эффекта является синхронное вращение хотя бы одного тела. BYORP-эффект должен приводить или к сближению астероидов по скручивающейся спирали, или к разрыву двойной системы. В работе [16] показано, что характерное время существования двойных астероидов в главном поясе или среди астероидов, сближающихся с Землей (АСЗ), составляет 100 тыс. лет.

Детальная аналитическая модель BYORP-эффекта разработана в [17] и [18]. Выражение для силы светового давления разлагается в ряд Фурье в системе координат, жестко связанной со спутником астероида. Этот подход позволяет рассматривать тела произвольной формы и выполнять осреднение по времени. Основным результатом — возможность описания BYORP-эффекта с помощью «BYORP-коэффициента»  $B$ , однозначно вычисляемого при задании модели, представляющей форму объекта. Если спутник астероида движется по орбите, близкой к круговой, тогда влияние BYORP-эффекта описывается простыми эволюционными уравнениями для большой полуоси  $a$  и эксцентриситета  $e$  (в приближении  $e \ll 1$ ):

$$\frac{da}{dt} = \frac{FB}{c\eta'} \frac{a^{3/2}}{m_2\sqrt{\mu}}, \quad (8)$$

$$\frac{de}{dt} = -\frac{FB}{4c\eta'} \frac{ea^{3/2}}{m_2\sqrt{\mu}}. \quad (9)$$

Здесь  $F$  — поток излучения Солнца на гелиоцентрическом расстоянии, равном большой полуоси гелиоцентрической орбиты астероида  $a'$ ,  $\eta' = \sqrt{1 - e'^2}$ ,  $e'$  — эксцентриситет гелиоцентрической орбиты астероида,  $c$  — скорость света,  $\mu = G(m_1 + m_2)$  — гравитационный параметр двойной системы,  $G$  — гравитационная постоянная,  $m_1$ ,  $m_2$  — массы астероида и его спутника соответственно. Как следует из уравнений (8) и (9), если орбита расширяется ( $B > 0$ ), тогда эксцентриситет стабилизируется, в противном случае эксцентриситет растет. Для эллиптических орбит ситуация усложняется и необходимо учитывать дополнительные слагаемые в разложении силы светового давления в ряд Фурье [17].

Коэффициент  $B$  зависит от формы тела и наклона плоскости орбиты двойного астероида к плоскости гелиоцентрической орбиты. Примем, что мгновенное значение силы светового давления  $\mathbf{F}_{SPR}(M, M')$ , действующей на спутник, зависит от средней аномалии второго астероида  $M$  на астероидоцентрической орбите и средней аномалии двойного астероида  $M'$  на гелиоцентрической орбите.

В этом случае для нахождения коэффициента  $B$  необходимо выполнить двукратное осреднение по средним аномалиям  $M$ ,  $M'$  и найти проекцию на направление орбитального движения двойного астероида ( $\mathbf{t}$  — соответствующий единичный вектор):

$$B = \mathbf{t} \cdot \frac{1}{(2\pi)^2} \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{\mathbf{F}_{SPR}}{P(r_s)} dM dM', \quad (10)$$

где

$$P(r_s) = \frac{F}{c} \left( \frac{a'}{r_s} \right)^2$$

есть давление света на единицу площади тела на гелиоцентрическом расстоянии  $r_s$ . BYORP-коэффициент  $B$  имеет размерность площади, и его можно нормировать, разделив на квадрат эффективного радиуса спутника астероида. Коэффициент  $B$  является функцией различных физических параметров, описывающих альбедо, топографию поверхности и ее теплофизические свойства. Однако наиболее существенные изменения коэффициента  $B$  связаны с вариациями наклона плоскости орбиты второго тела относительно плоскости гелиоцентрической орбиты двойного астероида. При изменении наклона от  $0$  до  $180^\circ$  коэффициент  $B$  плавно изменяется, переходя от положительных значений к отрицательным и обратно. Предполагается, что при захвате в синхронное вращение вероятность того, что коэффициент  $B$  будет иметь положительное или отрицательное значение, близка к 50 %.

Мы рассмотрели изолированный BYORP-эффект. Учет дополнительных эволюционных эффектов в системах двойных астероидов может привести к качественным изменениям характера эволюции. В частности, в работе [19] показано, что влияние приливов может компенсировать уменьшение большой полуоси орбиты синхронно вращающегося спутника астероида, вызываемого BYORP-эффектом при отрицательном значении коэффициента  $B$ , если первый астероид вращается с угловой скоростью большей, чем среднее движение спутника астероида. В этом случае под влиянием приливов большая полуось орбиты спутника должна увеличиваться. Основываясь на теории диссипации энергии в астероидах, имеющих строение типа «груда булыжников» (rubble pile), показано, что для всех двойных астероидов со спутниками на синхронных орбитах с коэффициентом  $B < 0$  должен наблюдаться переход к устойчивому равновесию, в котором влияние этих эффектов уравнивается. В этом случае



действие BYORP-эффекта приводит к возможности существования двойных астероидов на длительных интервалах времени.

## Наблюдения проявлений эффектов Ярковского и YORP

Точные наблюдения астероидов позволяют фиксировать проявления эффектов Ярковского и YORP.

### Проявления эффекта Ярковского по данным наблюдений

Наблюдения астероидов не позволяют непосредственно измерить вековое изменение большой полуоси орбиты  $da$ , обусловленное эффектом Ярковского. Но возникающее, как следствие, приращение среднего движения

$$dn = -\frac{3}{2} \frac{n}{a} da$$

приводит к дополнительному сдвигу положения тела на орбите, пропорциональному  $t^2$ , где  $t$  — интервал времени между эпохами наблюдений. Аналогичная зависимость величины проявления действия эффекта от времени справедлива и для YORP-эффекта.

Первыми астероидами, для которых удалось экспериментально подтвердить действие эффекта Ярковского, стали (6489) Golevka [20] в 2003 г. и (152563) 1992 BF [21] в 2008 г. В табл. 1 приведен список астероидов для которых получены оценки влияния эффекта Ярковского по результатам наблюдений по состоянию на декабрь 2014 г. [11]. В табл. 1 включены астероиды, для которых отношение сигнал—шум SNR больше 5. Здесь  $\bar{r} = a\sqrt{1 - e^2}$  — среднее взвешенное по потоку излучения расстояние от Солнца,  $D$  — оценка диаметра астероида,  $da/dt$  — оценка векового изменения большой полуоси,  $\Delta t$  — интервал времени, на котором оценивалось влияние эффекта Ярковского.

К настоящему времени влияние эффекта Ярковского оценено для более чем 70 астероидов [22]. По результатам обработки наблюдений астероидов, выполняемых астрометрическим спутником Gaia, предполагается оценить влияние эффекта Ярковского для 64 астероидов [23].

Таблица 1. Список астероидов, для которых подтверждено влияние эффекта Ярковского

Астероид	$\bar{r}$ , а. е.	$D$ , м	$da/dt \times 10^{-4}$ , а. е./ (млн лет)	SNR	$\Delta t$ , годы
(101955) Bennu	1.10	493	$-18.95 \pm 0.10$	194.6	1999–2013
(2340) Hathor	0.75	210	$-17.38 \pm 0.70$	24.9	1976–2014
(152563) 1992 BF	0.87	510	$-11.82 \pm 0.56$	21.0	1953–2011
(2009) BD	1.01	4	$-489 \pm 35$	13.9	2009–2011
(2005) ES70	0.70	61	$-68.9 \pm 7.9$	8.7	2005–2013
(4179) Toutatis	1.96	2800	$-3.75 \pm 0.45$	8.4	1934–2014
(2062) Aten	0.95	1300	$-6.60 \pm 0.80$	8.3	1955–2014
(1999) MN	0.50	175	$54.6 \pm 6.8$	8.1	1999–2014
(6489) Golevka	2.01	280	$-4.52 \pm 0.60$	7.5	1991–2011
(1862) Apollo	1.22	1400	$-1.58 \pm 0.24$	6.5	1930–2014
(2006) CT	1.07	119	$-47.6 \pm 7.7$	6.2	1991–2014
(3908) Nyx	1.71	1000	$9.6 \pm 1.7$	5.8	1980–2014
(2000) PN8	1.22	130	$49.3 \pm 8.7$	5.7	2000–2014
(162004) 1991 VE	0.67	827	$19.2 \pm 3.6$	5.3	1954–2014
(10302) 1989 ML	1.26	248	$38.7 \pm 7.5$	5.2	1989–2012

## Проявления YORP-эффекта по данным наблюдений

Анализ популяции малых астероидов показывает, что YORP-эффект влияет на эволюцию их угловых скоростей вращения и наклонов осей вращения. Однако по результатам наблюдений отдельных астероидов пока удастся определить только вековые эффекты изменения угловой скорости вращения  $\omega$ . В простейшем случае определить влияние YORP-эффекта на угловую скорость вращения  $\omega$  можно на основе анализа измерений фазы  $\varphi$ . Если частота  $f$  линейно меняется со временем

$$f = f_0 + \frac{df}{dt}t,$$

то фаза  $\varphi$  будет изменяться по квадратичному закону

$$\varphi = \varphi_0 + f_0 t + \frac{1}{2} \frac{df}{dt} t^2.$$

Сложность состоит в том, что вариации частоты  $f_0$  со временем приводят к линейному сдвигу фазы даже в том случае, когда YORP-эффект не действует. Если исключить корреляцию между  $f_0$  и  $df/dt$ , то условием фиксации YORP-эффекта на интервале времени  $t$  станет изменение фазы

$$\Delta\varphi \simeq \frac{1}{8} \frac{df}{dt} t^2.$$

Таблица 2. Список астероидов, для которых подтверждено влияние YORP-эффекта

Астероид	$d\omega/dt \times 10^{-8}$ , (сут.) $^{-2}$	$H$ , зв. вел.	$P$ , часы	$\gamma$ , град.	$\bar{\tau}$ , а. е.	Ссылки
(54509) YORP	$350 \pm 35$	22.6	0.203	173	0.98	[24, 25]
(25143) Itokawa	$3.5 \pm 0.4$	18.9	12.132	178	1.27	[26]
(1620) Geographos	$1.2 \pm 0.2$	15.6	5.223	152	1.18	[27]
(1862) Apollo	$5.5 \pm 1.2$	16.3	3.065	162	1.22	[28, 29]
(3103) Eger	$1.4 \pm 0.6$	15.3	5.710	176	1.32	[30]
(161989) Cacus	$1.9 \pm 0.3$	17.5	3.755	178	1.10	[31]

К настоящему времени надежно определено изменение угловой скорости осевого вращения  $d\omega/dt$ , вызываемое YORP-эффектом, для шести астероидов (табл. 2). Здесь  $H$  — абсолютная звездная величина астероида,  $P$  — период осевого вращения.

### BYORP-эффект

Выявить влияние BYORP-эффекта на эволюцию двойных астероидов по результатам наблюдений пока не удалось. В настоящее время реализуется несколько кампаний по наблюдению двойных астероидов с целью оценки влияния как «чистого» BYORP-эффекта, так и смешанных эффектов. Для выявления BYORP-эффекта требуется определить приращение средней аномалии спутника астероида, связанное с изменением большой полуоси его орбиты. Этот дрейф будет пропорционален квадрату времени. Относительное изменение  $\Delta M$  средней аномалии  $M$  спутника астероида, обусловленное BYORP-эффектом за время  $t$ , равно

$$a \Delta M = -\frac{3}{4} n \frac{da}{dt} t^2,$$

где  $n$  — среднее движение спутника, производная  $da/dt$  берется из уравнения (7). Соответственно задержка момента наступления покрытия астероида составит

$$\delta t \simeq -\frac{3}{4} \frac{da}{dt} \frac{1}{a} t^2.$$

Одним из наиболее существенных является результат, полученный в работе [32]: в течение 17-летнего периода наблюдений двойного астероида (175706) 1996 FG3 не обнаружен дрейф, соответствующий BYORP-эффекту.

## Приложения эффекта Ярковского

### Определение физических свойств астероидов

Эффект Ярковского может быть использован как инструмент для исследования физических свойств астероидов. Это возможно, поскольку величина дрейфа больших полуосей орбит астероидов зависит от их физических свойств: в первую очередь от наклона оси вращения, размера и массы, а также от тепловых и отражательных свойств поверхности и угловой скорости вращения. Высокоточные наблюдения позволяют определять форму и направление вращения астероидов.

Сведения о параметрах, характеризующих эффект Ярковского, позволяют получить статистическое описание популяции астероидов. Оказалось, что в большинстве случаев  $da/dt < 0$  (см., например, табл. 1), 78 % астероидов имеют обратное вращение [11]. Большинство астероидов, для которых определена величина дрейфа большой полуоси, обусловленная эффектом Ярковского, относятся к астероидам, сближающимся с Землей. Эти астероиды выбрасываются в область движения планет земной группы из главного пояса после того, как они попадают или в зону векового резонанса  $\nu_6$ , или в зону резонанса средних движений 1:3 с Юпитером. Область векового резонанса  $\nu_6$  находится вблизи внутренней границы пояса астероидов, следовательно, для попадания в нее дрейф большой полуоси орбиты астероида должен быть отрицательным  $da/dt < 0$ , а осевое вращение астероида — обратным. Орбиты астероидов, приходящих в зону резонанса 1:3, могут иметь как положительный, так и отрицательный знак дрейфа большой полуоси, в этом случае между астероидами с прямым и обратным направлениями осевого вращения должен наблюдаться паритет [33].

### Оценка потенциальной опасности падения астероидов

Позиционные наблюдения астероидов позволяют получать надежные орбиты, которые могут использоваться для оценки вероятности столкновения с Землей потенциально опасных объектов. После этого наступает второй этап исследований — получение данных о физических параметрах астероидов, чтобы в модели возмущающих сил учесть негравитационные возмущения, включая эффект Ярковского. Сейчас в рамках решения этой задачи наиболее активно исследуются астероиды (101955) Bennu, (29075) 1950 DA, (99942) Apophis.

## Источник метеоритов

Вопрос о происхождении метеоритов, обнаруживаемых на Земле, долгое время оставался нерешенным. Анализ орбит метеороидов показывал, что большинство из этих объектов пришли к Земле из главного пояса астероидов. Теория медленного дрейфа астероидов из главного пояса в область движения планет земной группы под влиянием эффекта Ярковского этого объяснить не могла, так как для этого требовались нереальные предположения о теплофизических свойствах объектов или о скорости их осевого вращения. В работе [34] был предложен механизм быстрой доставки астероидов главного пояса к Земле. Астероиды, двигаясь в главном поясе, сталкиваются и дробятся на более мелкие тела (предшественники метеороидов). Чем меньше размеры этих тел, тем более сильное влияние эффекта Ярковского они испытывают. Под действием эффекта Ярковского они дрейфуют к областям векового резонанса  $\nu_6$ , расположенным у внутренней границы главного пояса, или резонанса средних движений с Юпитером 1:3 и выбрасываются в окрестности орбит планет земной группы. После этого, в течение относительно короткого времени, метеороиды сталкиваются с планетами.

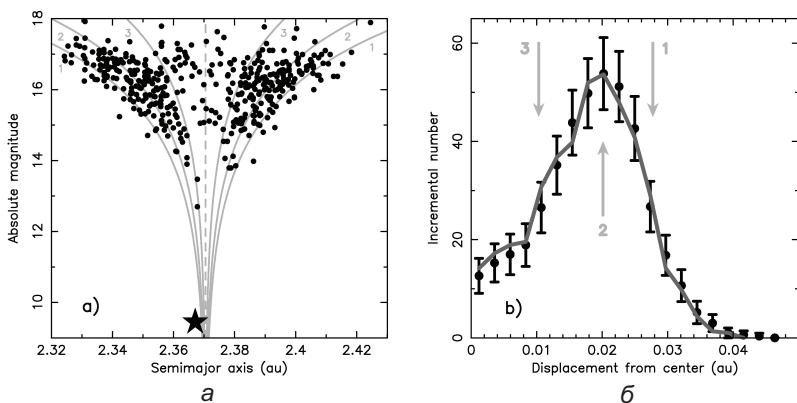
### Оценка возраста молодых семейств и пар астероидов: сближение орбит

Эффект Ярковского используется для оценки возраста относительно молодых (до 10 млн лет) семейств астероидов [35, 36]. Для этих семейств проявления детерминированного хаоса еще малы. Исходя из предположения, что семейства сформировались в результате распада и дробления крупных родительских тел, анализируя дрейф долготы восходящего узла и долготы перигентра, можно оценить интервал времени, прошедший с момента, когда орбиты всех тел были максимально близки. Скорость движения узлов и перигентров существенно зависит от значения большой полуоси, которая может изменяться вековым образом под влиянием эффекта Ярковского.

Аналогичный подход можно применить и для исследования пар астероидов на близких орбитах. Принимая во внимание эффект Ярковского, можно оценить время, когда оба астероида находились в пределах сферы Хилла родительского тела [37, 38].

## Оценка возраста старых семейств астероидов: рассеяние орбит

Для определения возраста старых (старше 10 млн лет) семейств астероидов метод поиска момента максимального сближения орбит неприменим вследствие проявления детерминированного хаоса в динамической эволюции орбит: динамическая система «забывает» свое исходное состояние. Для оценки возраста и описания свойств семейств астероидов используют собственные элементы орбит [39] (заметим, что из наблюдений определяются оскулирующие элементы [40]), являющиеся квазиинтегралами уравнений движения [41]. В то время как детерминированный хаос, проявляющийся на длительных интервалах времени, приводит к медленной диффузии собственных эксцентриситетов  $e_P$  и наклонов  $i_P$ , эффект Ярковского является основным фактором, изменяющим значения собственных больших полуосей  $a_P$  орбит астероидов километрового размера. В зависимости от направления осевого вращения большие полуоси орбит либо увеличиваются (прямое вращение), либо уменьшаются (обратное вращение). С уменьшением размера астероида скорость изменения большой полуоси растет, что приводит к формированию V-образного распределения астероидов на диаграмме «абсолютная звездная величина  $H$  — собственная большая полуось  $a_P$ » (см. рисунок, *a*).



Семейство Erigone [11]

На рисунке показаны распределение 432 астероидов семейства Erigone (черные точки) на диаграмме « $H - a_P$ » (*a*) и зависимость

числа астероидов от значения собственной большой полуоси  $a_P$  при  $H = 16^m$  ( $b$ ). Звездочкой отмечено положение астероида (163) Erigone. Серые линии ( $a$ ) и стрелки ( $b$ ) соответствуют уравнению  $0.2H = \lg(|a_P - a_0|/C)$  для  $a_0 = 2.3705$  а. е. при трех значениях  $C = 1, 2, 3$ . Оценивая скорость удаления собственных больших полуосей  $a_P$  от  $a_0$  для различных значений  $H$ , которые коррелируют с размером астероидов, можно статистически оценить время, прошедшее от начала формирования семейства. Рассмотренный метод позволяет оценивать возраст семейств астероидов на интервалах времени от нескольких десятков миллионов до 2–3 млрд лет.

## Приложения YORP- и BYORP-эффектов

### Распределение угловых скоростей вращения и наклонов осей вращения астероидов

Распределение частот вращения больших астероидов главного пояса удовлетворяет распределению Максвелла со средним значением периодов 8–12 ч. Однако для астероидов, имеющих размер менее 20 км, наблюдается заметное отклонение от этого распределения с большим количеством астероидов, имеющих очень медленные или очень быстрые скорости вращения. Заметим, что для AC3 также наблюдается аналогичное распределение угловых скоростей вращения. После исключения из рассмотрения двойных астероидов распределение угловых скоростей вращения астероидов главного пояса километрового размера становится равномерным [42].

Подобное распределение угловых скоростей вращения можно объяснить влиянием YORP-эффекта. Экстремальные значения скорости вращения (очень малые или очень большие) зависят от размеров астероидов. Астероиды, эволюционирующие с увеличением скорости вращения, теряют массу в процессе разрушения под действием центробежной силы (модель «груды булыжников»!). Астероиды, имеющие слишком малую скорость углового вращения, переходят в режим хаотического кувыркания, при котором угловая скорость вращения остается малой. В результате столкновений астероидов скорости вращения могут изменяться. В этом случае дальнейшая эволюция скорости вращения будет идти по одному из двух описанных сценариев: либо расти до предельных значений, приводящих к разрушению астероидов, либо оставаться малой.

Распределение наклонов осей вращения больших астероидов главного пояса почти изотропное с небольшим избытком тел, вращающихся в прямом направлении. С другой стороны, полюса малых (менее 30 км) астероидов ориентированы в направлении северного и южного полюсов эклиптики. Это проявление YORP-эффекта, под влиянием которого наклоны вращения стремятся к экстремальным значениям [43].

### **Формирование и долговременная эволюция двойных астероидов**

BYORP-эффект играет важную роль в эволюции двойных астероидов. Весьма вероятно, что большинство наблюдаемых двойных астероидов с компонентами малой массы, имеющими строение «груды булыжников», находятся в равновесном состоянии, где влияние BOYRP-эффекта и приливных сил уравновешено.

Среди нерешенных задач, связанных с динамической эволюцией двойных астероидов, можно отметить исследование особенностей миграции полюса орбиты в двойной системе. В работе [8] была выдвинута идея, что эта эволюция происходит аналогично влиянию YORP-эффекта. В развитие этой идеи в работе [44] было показано, что наклон орбиты должен мигрировать к одному из асимптотических значений: 0, 90 или 180°. Учет зависимости BYORP-коэффициента  $B$  от наклона  $i$ , следовательно, возможности перемены знака коэффициента  $B$  приводит к выводу о том, что углы наклона должны концентрироваться в промежутках между асимптотическими значениями [16]. В дополнение отметим результат работы [18], в которой показано, что сжатие центрального астероида не должно вызывать изменений наклона орбиты астероида, являющегося спутником. Очевидно, что пока нет полного понимания особенностей эволюции орбит в системах двойных астероидов.

### **Заключение**

Процесс исследования эффектов Ярковского и YORP, а также проявлений этих эффектов в динамической эволюции малых тел еще далек от завершения. Количество астероидов, для которых будут определены параметры, описывающие влияние этих эффектов, будет расти, что позволит уточнить вклад каждого из эффектов в долгопериодическую эволюцию астероидов.



Поиск проявлений YORP-эффекта в системах двойных астероидов (обнаружение сигнала от YORP-эффекта или подтверждение его отсутствия) позволит уточнить представления об эволюции двойных астероидов, особенностях их образования, физических параметрах и времени жизни.

Работа выполнена при поддержке Правительства Российской Федерации (постановление № 211, контракт № 02.A03.21.0006) и гранта РФФИ № 18-02-00015.

## Библиографические ссылки

1. *Ярковский И. О.* Плотность светового эфира и оказываемое им сопротивление движению. — Брянск : Тип. Юдина, 1901.
2. *Beekman G. I. O.* Yarkovsky and the Discovery of 'his' Effect // Journal for the History of Astronomy. — 2006. — Vol. 37. — P. 71–86.
3. *Opik E. J.* Collision probability with the planets and the distribution of planetary matter // Proc. R. Irish Acad. Sect. A. — 1951. — Vol. 54. — P. 165–199.
4. *Радзиевский В. В.* Механизм разрушения астероидов и метеоритов // Астрон. журн. — 1952. — Т. 29. — С. 162–170.
5. *Paddack S. J.* Rotational bursting of small celestial bodies: Effects of radiation pressure. // J. Geophys. Res. — 1969. — Vol. 74. — P. 4379–4381.
6. *Rubincam D. P.* Radiative Spin-up and Spin-down of Small Asteroids // Icarus. — 2000. — Vol. 148. — P. 2–11.
7. *Виноградова В. П., Радзиевский В. В.* Об ускорении спутников Марса и стабилизации орбит искусственных спутников Земли // Астрон. журн. — 1965. — Т. 42. — С. 424.
8. *Čuk M., Burns J. A.* Effects of thermal radiation on the dynamics of binary NEAs // Icarus. — 2005. — Vol. 176. — P. 418–431.
9. *Bottke W. F., Jr., Vokrouhlický D., Rubincam D. P., Broz M.* The Effect of Yarkovsky Thermal Forces on the Dynamical Evolution of Asteroids and Meteoroids // Asteroids III / ed. by W. F. Bottke, Jr., A. Cellino, P. Paolicchi, R. P. Binzel. — 2002. — P. 395–408.
10. *Bottke W. F., Jr., Vokrouhlický D., Rubincam D. P., Nesvorný D.* The Yarkovsky and Yorp Effects: Implications for Asteroid Dynamics // Annual Review of Earth and Planetary Sciences. — 2006. — Vol. 34. — P. 157–191.
11. *Vokrouhlický D., Bottke W. F., Chesley S. R. et al.* The Yarkovsky and YORP Effects / D. Vokrouhlický, W. F. Bottke, S. R. Chesley et al. //

- Asteroids IV / ed. by P. Michel, F. E. DeMeo, W. F. Bottke. — 2015. — P. 509—531.
12. *Vokrouhlický D., Milani A.* Direct solar radiation pressure on the orbits of small near-Earth asteroids: observable effects? // *Astron. Astrophys.* — 2000. — Vol. 362. — P. 746—755.
  13. *Vokrouhlický D., Bottke W. F., Jr.* The Yarkovsky thermal force on small asteroids and their fragments. Choosing the right albedo // *Astron. Astrophys.* — 2001. — Vol. 371. — P. 350—353.
  14. *Rubincam D. P.* Asteroid orbit evolution due to thermal drag // *J. Geophys. Res.* — 1995. — Vol. 100. — P. 1585—1594.
  15. *Breiter S., Michalska H., Vokrouhlický D., Borczyk W.* Radiation-induced torques on spheroids // *Astron. Astrophys.* — 2007. — Vol. 471. — P. 345—353.
  16. *Čuk M.* Formation and Destruction of Small Binary Asteroids // *Astrophys. J. Lett.* — 2007. — Vol. 659. — P. L57—L60.
  17. *McMahon J., Scheeres D.* Secular orbit variation due to solar radiation effects: a detailed model for BYORP // *Celest. Mech. Dyn. Astr.* — 2010. — Vol. 106. — P. 261—300.
  18. *McMahon J., Scheeres D.* Detailed prediction for the BYORP effect on binary near-Earth Asteroid (66391) 1999 KW4 and implications for the binary population // *Icarus.* — 2010. — Vol. 209. — P. 494—509.
  19. *Jacobson S. A., Scheeres D. J.* Long-term Stable Equilibria for Synchronous Binary Asteroids // *Astrophys. J. Lett.* — 2011. — Vol. 736. — P. L19. 1104.4671.
  20. *Chesley S. R., Ostro S. J., Vokrouhlický D. et al.* Direct Detection of the Yarkovsky Effect by Radar Ranging to Asteroid 6489 Golevka // *Science.* — 2003. — Vol. 302. — P. 1739—1742.
  21. *Vokrouhlický D., Chesley S. R., Matson R. D.* Orbital Identification for Asteroid 152563 (1992 Bf) Through the Yarkovsky Effect // *Astron. J.* — 2008. — Vol. 135. — P. 2336—2340.
  22. *Faggioli L., Del Vigna A., Milani A. et al.* Detection of Yarkovsky effect and solar radiation pressure on Near-Earth Asteroids // *AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts : AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts.* — 2016. — Vol. 48. — P. 311.07.
  23. *Mouret S., Mignard F.* Detecting the Yarkovsky effect with the Gaia mission: list of the most promising candidates // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2011. — Vol. 413. — P. 741—748.
  24. *Lowry S. C., Fitzsimmons A., Pravec P. et al.* Direct Detection of the Asteroidal YORP Effect // *Science.* — 2007. — Vol. 316. — P. 272.

25. *Taylor P. A., Margot J.-L., Vokrouhlický D. et al.* Spin Rate of Asteroid (54509) 2000 PH5 Increasing Due to the YORP Effect // *Science*. — 2007. — Vol. 316. — P. 274.
26. *Lowry S. C., Weissman P. R., Duddy S. R. et al.* The internal structure of asteroid (25143) Itokawa as revealed by detection of YORP spin-up // *Astron. Astrophys.* — 2014. — Vol. 562. — P. A48.
27. *Durech J., Vokrouhlický D., Kaasalainen M. et al.* Detection of the YORP effect in asteroid (1620) Geographos // *Astron. Astrophys.* — 2008. — Vol. 489. — P. L25–L28.
28. *Durech J., Vokrouhlický D., Kaasalainen M. et al.* New photometric observations of asteroids (1862) Apollo and (25143) Itokawa - an analysis of YORP effect // *Astron. Astrophys.* — 2008. — Vol. 488. — P. 345–350.
29. *Kaasalainen M., Ďurech J., Warner B. D. et al.* Acceleration of the rotation of asteroid 1862 Apollo by radiation torques // *Nature*. — 2007. — Vol. 446. — P. 420–422.
30. *Ďurech J., Vokrouhlický D., Baransky A. R. et al.* Analysis of the rotation period of asteroids (1865) Cerberus, (2100) Ra-Shalom, and (3103) Eger - search for the YORP effect // *Astron. Astrophys.* — 2012. — Vol. 547. — P. A10. 1210.2219.
31. *Durech J., Vokrouhlický D., Pravec P. et al.* YORP and Yarkovsky effects in asteroids (1685) Toro, (2100) Ra-Shalom, (3103) Eger, and (161989) Cacus // *ArXiv e-prints*. — 2017. 1711.05987.
32. *Scheirich P., Pravec P., Jacobson S. A. et al.* The binary near-Earth Asteroid (175706) 1996 FG<sub>3</sub> - An observational constraint on its orbital evolution // *Icarus*. — 2015. — Vol. 245. — P. 56–63. 1406.4677.
33. *Morbidelli A., Vokrouhlický D.* The Yarkovsky-driven origin of near-Earth asteroids // *Icarus*. — 2003. — Vol. 163. — P. 120–134.
34. *Vokrouhlický D., Farinella P.* Efficient delivery of meteorites to the Earth from a wide range of asteroid parent bodies // *Nature*. — 2000. — Vol. 407. — P. 606–608.
35. *Nesvorný D., Bottke W. F., Jr., Dones L., Levison H. F.* The recent breakup of an asteroid in the main-belt region // *Nature*. — 2002. — Vol. 417. — P. 720–771.
36. *Nesvorný D., Bottke W. F., Levison H. F., Dones L.* Recent Origin of the Solar System Dust Bands // *Astrophys. J.* — 2003. — Vol. 591. — P. 486–497.
37. *Vokrouhlický D., Nesvorný D.* Pairs of asteroids probably of a common origin // *Astron. J.* — 2008. — P. 280–290.
38. *Vokrouhlický D., Nesvorný D.* The Common Roots of Asteroids (6070) Rheinland and (54827) 2001 NQ8 // *Astron. J.* — 2009. — Vol. 137. — P. 111–117.

39. *Knežević Z., Milani A.* Proper element catalogs and asteroid families // *Astron. Astrophys.* — 2003. — Vol. 403. — P. 1165—1173.
40. *Субботин М. Ф.* Введение в теоретическую астрономию. — М. : Наука, 1968.
41. *Knežević Z., Lemaître A., Milani A.* The Determination of Asteroid Proper Elements // *Asteroids III* / ed. by W. F. Bottke, Jr., A. Cellino, P. Paolicchi, R. P. Binzel. — 2002. — P. 603—612.
42. *Pravec P., Harris A. W., Vokrouhlický D. et al.* Spin rate distribution of small asteroids // *Icarus.* — 2008. — Vol. 197. — P. 497—504.
43. *Čapek D., Vokrouhlický D.* The YORP effect with finite thermal conductivity // *Icarus.* — 2004. — Vol. 172. — P. 526—536.
44. *Steinberg E., Sari R.* Binary YORP Effect and Evolution of Binary Asteroids // *Astron. J.* — 2011. — Vol. 141. — P. 55. 1010.2676.